

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A**  
**BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# **NÁVRH SIMULAČNÍHO MODELU ANTIBLOKOVACÍHO SYSTÉMU V AUTOMOBILU**

SIMULATION MODEL OF ABS IN PASSENGER CAR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JANA SVOBODOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ROBERT GREPL, Ph.D.**

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jana Svobodová

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Návrh simulačního modelu antiblokovacího systému v automobilu**

v anglickém jazyce:

### **Simulation model of ABS in passenger car**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá simulačním modelováním problému ABS u osobního automobilu v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Seznamte se s prostředím Matlab/Simulink/SimMechanics.
- 2) Vyhledejte informace o fungování systémů ABS u automobilů.
- 3) Vytvořte simulační model dynamiky pohybu jednoho kola a navrhnete k němu řízení ABS.
- 4) Testujte vlastnosti modelu při různém nastavení parametrů a vlastnostech modelů sensorů.
- 4) Vytvořte poloviční model automobilu a vytvořte k němu řízení ABS.
- 5) Vypracujte vizualizaci a dokumentaci.

Seznam odborné literatury:

- 1.Valášek, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995
- 2.Dušek, F.: Matlab a Simulink, skriptum ČVUT
- 3.Kratochvíl: Mechanika těles - dynamika, skriptum FSI VUT v Brně
- 4.Grepl, R.: Modelování mechatronických systémů v Matlab/SimMechanics, BEN, 2007

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Robert Grepl, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 5.11.2008

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

---

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a samostatně zpracovaná.

Prohlašuji, že citace použitých pramenů jsou úplné a že jsem ve své práci neporušila autorské práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech související s právem autorským).

V Brně 29. 5. 2009

---

Podpis

---

---

## **Poděkování**

Ing. Greplovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za trpělivost, rady a čas, který mi věnoval. Dále všem, kteří mi přímo či nepřímo pomáhali při vzniku této práce.

---

---

## **Abstrakt**

Rozvoj elektroniky způsobil revoluci v automobilovém průmyslu. Mezníkem ve vývoji bezpečnostních elektronických systémů se stal protiblokovací systém. ABS detekuje náchylnost k blokování kol, ke kterému může dojít při brždění za kritických jízdních podmínek, a následně zasáhne. Dalším milníkem je využití simulačních programů. Simulace umožňuje opakovaně provádět testy a najít tak optimální řešení daného problému ještě před použitím v praxi, čímž se výrazně sníží čas a náklady na vývoj.

V práci je popsána nejdůležitější složka bezpečnostních systémů – brzdová soustava a dále celý brzdový proces systému ABS. Pomocí matematického popisu kola je v programu Matlab-Simulink pro simulaci jízdních podmínek sestaven čtvrtinový model vozidla a k němu následně vytvořen systém ABS. Ke konci se nachází zhodnocení a graficky znázorněné výsledky simulací brždění.

## **Klíčová slova:**

ABS Protiblokovací systém, brzdová soustava, simulace

## **Abstract**

The development of electronics caused revolution the automobile industry. Antilock-Brake-System have become a milestone in the development of electronic security systems. ABS detects susceptibility to locking the wheels, which may occur during braking for critical driving conditions, and then hits. Using of simulation programs is another milestone. Simulation allows repeating of tests and find the best solution of the problem before introduction in practice. Time and development costs are then significantly reduced.

In the work is described the most important component of security systems - the braking system and the entire braking process of ABS system. With using a mathematical description of the wheel is in the Matlab-Simulink made quarter model of the vehicle to simulate driving conditions and then created to it a system of ABS. At the end is there an assessment and graphically shown the results of simulations braking.

## **Key words**

ABS Anti-lock Brake System, braking system, simulation

---

---

## OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Formulace problému a cíle řešení .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Bezpečnostní systémy v automobilu.....</b>	<b>9</b>
3.1	EBV .....	9
3.2	ASR.....	9
3.3	ASC.....	10
3.4	ESP .....	10
3.5	ABS.....	10
3.5.1	Historie: .....	10
3.5.2	Požadavky na ABS .....	11
3.5.3	Pracovní rozmezí ABS .....	11
3.5.4	Regulační obvod .....	12
<b>4</b>	<b>Brzdová soustava a její komponenty .....</b>	<b>13</b>
4.1	Varianty systému .....	16
4.2	Brždění.....	17
4.2.1	Fáze zvyšování tlaku .....	17
4.2.2	Fáze stabilizace tlaku.....	18
4.2.3	Fáze snižování tlaku .....	18
4.2.4	Regulace brždění .....	19
<b>5</b>	<b>Fyzikální základ.....</b>	<b>21</b>
5.1	Řiditelnost a jízdní stabilita .....	21
5.2	Síly přenášené pneumatikou .....	22
5.3	Skluz pneumatiky .....	23
<b>6</b>	<b>Vytvoření modelu v programu Matlab-Simulink.....</b>	<b>25</b>
6.1	Silové poměry kola .....	25
6.2	Pohybová rovnice kola .....	26
6.3	Model kola bez ABS.....	27
6.4	Řízení.....	31
6.4.1	Zamezení blokování prostřednictvím skluzu kola.....	31
6.4.2	Regulátor .....	33
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>36</b>
	<b>Použitá literatura a odkazy .....</b>	<b>I</b>
	<b>Seznam symbolů .....</b>	<b>II</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>III</b>
	<b>Seznam zkratk.....</b>	<b>IV</b>

---

---

# 1 Úvod

V dnešní době spěchu jsme denně odkazováni na použití dopravních prostředků. Každým rokem se ale na dopravních komunikacích zvyšuje nehodovost. Řidič není vždy schopen ovládat vozidlo. Pro zlepšení jízdních vlastností mu slouží bezpečnostní systémy. Jejich masivní vývoj nastal s rozvojem elektroniky. Dnes jsou všechny důležité funkce vozidla řízeny a regulovány elektronicky.

Se zvyšující se rychlostí vznikla potřeba zlepšení vlastností brzdové soustavy. Zlomem ve vývoji bylo zavedení antiblokovacího systému. Ten zabraňuje blokování kol během brždění, čímž se vozidlo zůstává ovladatelné a nedochází ke smyku. Brzdová soustava je důležitým systémem pro bezpečnost vozidla, proto se neustále vyvíjí a inovuje. Důkazem toho jsou další systémy, jenž na ABS navázaly nebo jen doplňují jeho funkci.

Protože vývoj a zdokonalování na skutečných modelech by byl nákladný, používají se softvérová prostředí. Simulační programy umožňují namodelovat a následně testovat vlastnosti nejen jednotlivých komponent, ale i celých soustav ještě před sestavením a tím optimalizovat vlastnosti chování. Jedním z možných produktů je Matlab-Simulink.

Za použití matematického popisu vozidla se snažím v této práci vytvořit čtvrtinový model automobilu, který dostatečně popisuje podélnou dynamiku tělesa a tím umožňuje simulovat brždění.



---

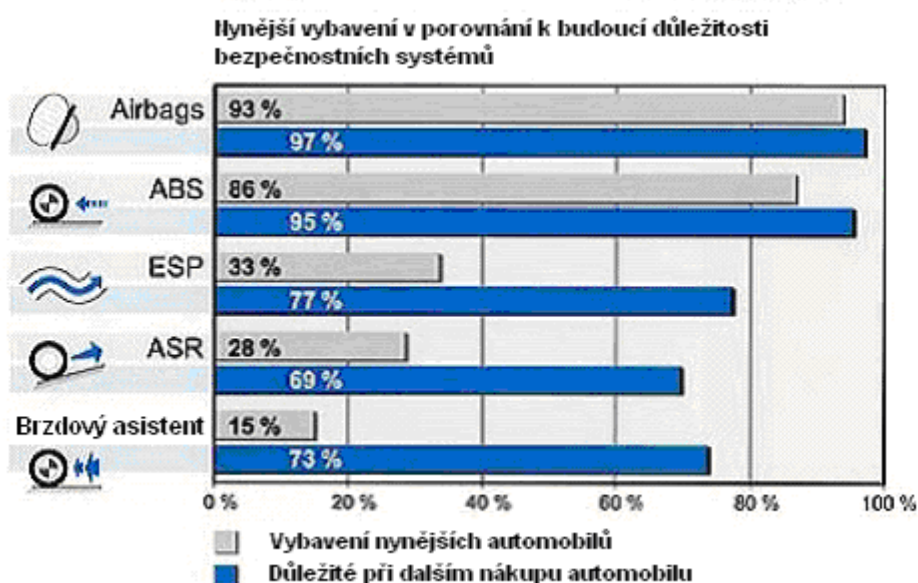
## 2 Formulace problému a cíle řešení

Prudkým sešlápnutím brzdového pedálu může dojít k zablokování kol a následně ke ztrátě stability a ovladatelnosti. Protiblokovací systém je založen na principu, kdy při brždění je brzdný tlak popouštěn a tím se kolo průběžně odvaluje. Pro bližší poznání fungování ABS je nutné vyhledání informací. Načerpáním znalostí se další práce zjednoduší, protože už počítáme s určitými problémy. Simulac je nejlepším nástrojem pro upřesnění si představy a potvrzení si dosažených poznatků. Seznámením se s prostředím Matlab-Simulink umožňuje vytvoření modelu dynamiky pohybu jednoho kola následný návrh řízení ABS. Úspěšným následným testováním vlastností modelu při různých nastavení parametrů, lze přejít k dalšímu kroku přidáním druhého kola. Řízení pro poloviční model automobilu skýtá dosud neřešené problémy. Závěrem je vždy zhodnocení a vykreslení dosažených výsledků.

### 3 Bezpečnostní systémy v automobilu

Dříve pro bezpečnost vozidla sloužilo pouze osvětlení a brzdová soustava. V dnešní době se již rozlišují bezpečnostní systémy:

- pasivní (bezpečnostní pásy, airbag)
- aktivní - zasahující do brzdové soustavy pro stabilizaci a ovladatelnost vozidla  
mohly rozvíjeny pouze s využitím elektroniky



Obr.1: Bezpečnostní systémy v automobilu [10].

#### 3.1 EBV (z německého Elektronische Bremsverteilsystem)

Elektronické rozdělování brzdné síly EBV upravuje brzdný tlak mezi přední a zadní nápravou. Při brzdění, kdy se posouvá těžiště vozu směrem dopředu, vzniká nebezpečí, že se zadní kola zablokují pro nedostatečné působení trakční síly. Tehdy nebo při prudkém projíždění zatáčkou EBV rozdělí brzdný účinek pomocí magnetických ventilů v jednotce ABS mezi brzdy přední a zadní nápravy, tím zajistí maximální brzdný výkon. Vozidlo vybavené systémem EBV má proto kratší brzdnou dráhu. [6]

#### 3.2 ASR (z německého Antriebs-Schlupf-Regelung)

Protipokluzový systém ASR zabraňuje protáčení poháněných kol, a to ve všech rychlostech, snížením výkonu motoru, čímž zajišťuje stabilitu a ovladatelnost při akceleraci. Řídící jednotka neustále porovnává otáčky kol hnané a nehnané nápravy. V případě vyhodnocení možného protáčení hnacím kol, systém ASR přibrzdí kola snížením točivého momentu

---

motoru. Tak se zajistí účinný přenos síly motoru na povrch vozovky. ASR lze vypnout, pokud je prokluz naopak žádoucí, např. při jízdě se sněhovými řetězy. [6]

### **3.3 ASC (z německého Automatische-Stabilitäts-Control)**

Automatická kontrola stability. Elektricky řízená soustava na základě neustálého porovnávání otáček všech kol. Rozdíl je ve způsobu omezování hnacího momentu – dvoustupňově. Nejprve je hnací kolo přibržděno a až po malé prodlevě je snížen točivý moment motoru. Nevýhodou je větší opotřebovávání brzd. [6]

### **3.4 ESP (z německého Electronic Stability Programme)**

ESP je elektronický systém jízdní stability. Je-li zjištěn nestabilní stav jízdních vlastností vozidla, dojde k samočinné aktivaci ESP, které vozidlo stabilizuje. ESP je rozšířením systémů ABS a ASR, má tedy informace o celkovém chování vozidla a dokáže zjistit, zda-li se vozidlo nepohybuje ve smyku pro případný zásah. [6]

### **3.5 ABS (z německého Anti-Blockier-System)**

Protiblokovací systém ABS je jedním ze systémů aktivní bezpečnosti vozidla. Má zabránit zablokování kola při brždění stálým odvalováním kola, čímž se zabrání ztrátě adheze mezi kolem a vozovkou. Cílem a výhodou brzdového systému s ABS je, že vozidlo je ovladatelné i při prudkém brždění, nebo brždění na kluzké vozovce.

Každé kolo má vlastní snímač otáček, který dává řídicí jednotce informace o rychlosti otáčení jednotlivých kol. Z rychlostí dvou diagonálně umístěných kol určuje řídicí jednotka tzv. referenční rychlost vozidla, kterou porovnává s otáčkami kol. Tímto neustálým porovnáváním se neustále zjišťují aktuální zrychlení, zpomalení a skluz každého z kol. Pokud dojde ke snížení rychlosti některého z kol pod stanovenou hodnotu oproti referenční rychlosti, řídicí jednotka odpustí bez ohledu na polohu brzdového pedálu tlak z brzdového systému a ihned po roztočení kola opět tlak napustí zpět. Systém ABS tak může učinit 8÷12× za sekundu a tím zajistit relativně stále otáčení kol a řiditelnost vozu. Při prudkém brždění tedy systém ABS udržuje brzdovou sílu na mezi adheze. V rychlém sledu za sebou dochází k zablokování kola a následné uvolnění až do zastavení vozidla. [6]

#### **3.5.1 Historie:**

Systém ABS byl vyvinut firmou BOSH v roce 1978. Již na počátku 20. století se ale objevovaly úvahy o tom, jak by bylo možné zabránit blokování kol při prudkém brždění. Firma Bosch ohlásila roku 1936 patent na „Zařízení k zabránění silného brždění kol motorového vozidla“. Avšak teprve s příchodem elektronického řízení mohli inženýři vyvinout protiblokovací brzdový systém, který byl dostatečně rychlý a robustní pro použití

---

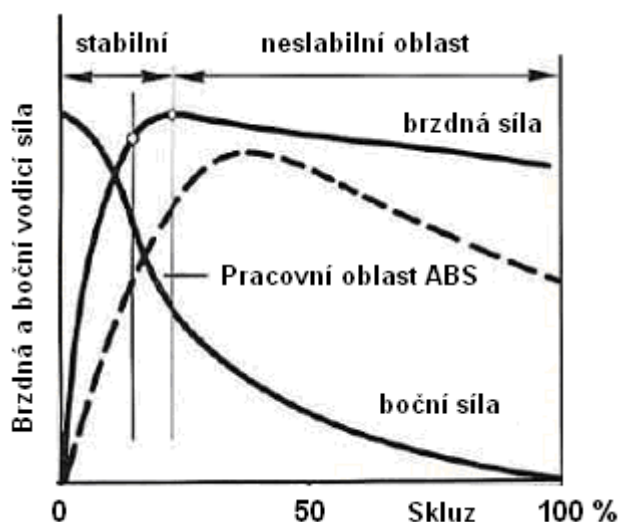
v motorových vozidlech. První komerční uplatnění našel systém jako zvláštní výbava vozu Mercedes-Benz třídy S a krátce na to také u BMW řady 7.

Firma Bosch však rozvíjela systém ABS dále. Výsledkem dalšího vývoje vznikly systémy ASR (protipokluzový systém, který zabraňuje protáčení kol při rozjíždění), elektronický stabilizační program ESP. V posledních letech se objevuje ABS společně s EBV (systém elektronického rozdělování brzdové síly). [5]

### 3.5.2 Požadavky na ABS

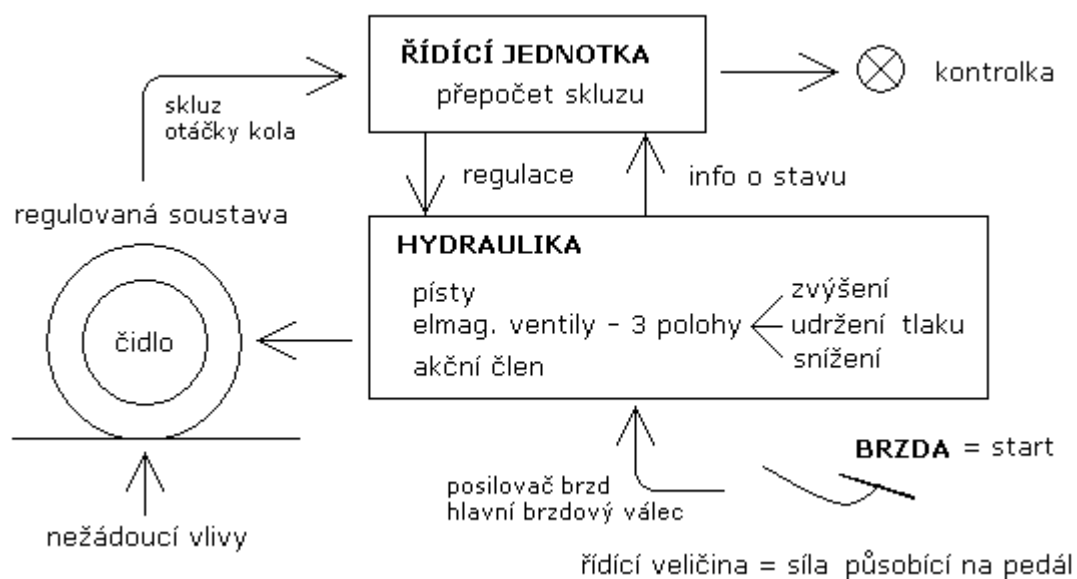
- zabránit nebezpečnému blokování kol během brždění a tím zvýšit bezpečnost jízdy
- regulace brzdové síly musí zajistit stabilitu a ovladatelnost vozidla při všech stavech jízdní dráhy od suché asfaltové vozovky až po náledí nebo u  $\mu$ -split vozovky
- regulační soustava musí optimálně využívat přilnavosti kol k vozovce, přičemž říditelnost má přednost před zkrácením brzdové dráhy
- regulace brzdové síly se musí rychle přizpůsobit změnám adheze vozovky
- musí zabránit rozkývání vozidla
- systém ABS musí rozeznat aquaplaning a vhodně na něj reagovat
- bezpečnostní systémy musí neustále kontrolovat bezchybnost funkce ABS; při zjištění závady systém vypnout a o jeho nedostupnosti informovat řidiče rozsvícením kontrolky
- při poruše ABS musí být zachována plná funkčnost základní brzdové soustavy bez ABS [7],[8]

### 3.5.3 Pracovní rozmezí ABS



Obr.2: Pracovní oblast ABS [5].

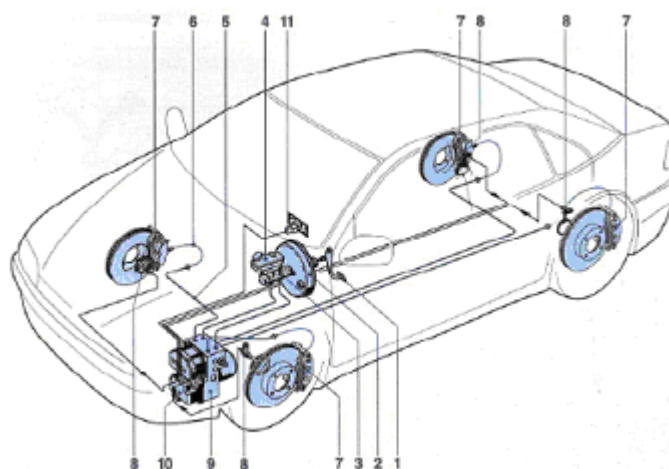
### 3.5.4 Regulační obvod



Obr.3: Regulační obvod ABS.

---

## 4 Brzdová soustava a její komponenty



Obr.4: Brzdové zařízení [3].

Obvyklá brzdová soustava se skládá z následujících komponent:

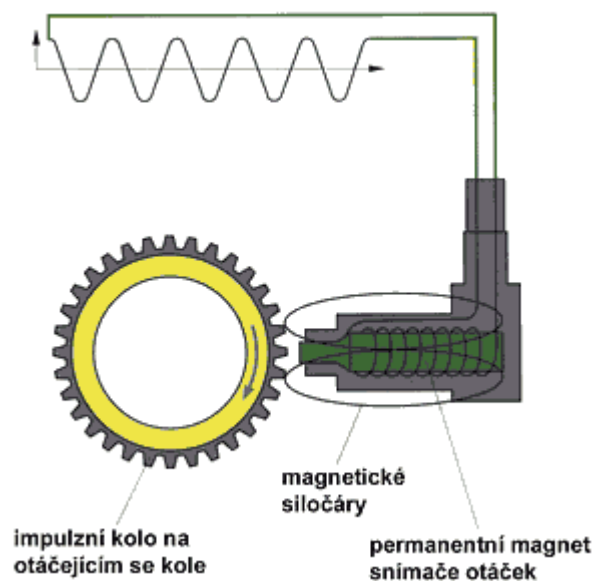
1. brzdový pedál
2. posilovač brzd
3. hlavní válec
4. vyrovnávací nádrž
5. brzdové potrubí
6. brzdová hadice
7. kolová brzda s brzdovým válcem kola
8. snímač otáček kola
9. hydroagregát
10. řídicí jednotka ABS
11. světelné kontrolky ABS

### Snímač otáček kola

Regulační přístroj odvádí ze signálů snímačů otáček kola rychlost otáčení kol. Pomocí těchto informací může systém posuzovat, zda se kolo protáčí nebo blokuje. Snímač otáček se skládá z permanentních magnetů a cívky, která je připojená na řídicí jednotku. Impulsové kolo je upevněno na kole a společně s ním se otáčí. Mezi zuby a mezerami mezi zuby impulzového kola se vykreslují magnetické siločáry. Proto se v cívce indukuje sinusové střídavé napětí, jehož frekvence je závislá na počtu otáček kola. Frekvence indukovaného napětí je úměrné k obvodové rychlosti kola. Při malém počtu otáček kola se vytvoří nejnižší napětí, při velkém počtu otáček nejvyšší. Aby se vyvarovalo technickým potížím jako kmitání, vibrace, teplota a vlhkost, zůstává mezi zdrojem impulsů a senzorem 2mm široká vzduchová mezera.

---

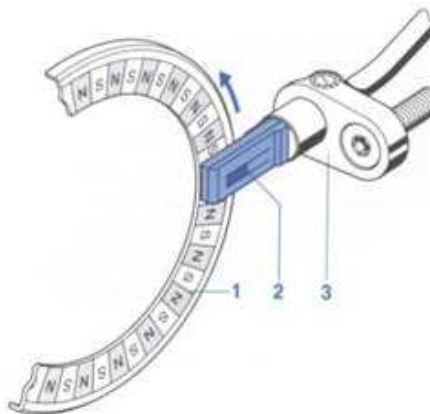
## Pasivní snímač otáček kola



Obr.5: Pasivní snímač otáček kola [5].

Každý zub vyrábí pozitivní a mezera negativní napětí. Proto jak frekvence, tak i amplituda střídavého napětí je proporcionální k počtu otáček kola.

## Aktivní snímač otáček kola



Obr.6: Aktivní snímač otáček kola [5].

1. Multipólový kruh
2. Měrný článek
3. Pouzdro snímače

Zde funkci zubů impulsového kola přebírají magnety, které jsou zabudovány se střídavou polaritou na multipólovém kruhu. Jeho otáčením kruhu vzniká trvalé měnící se magnetické

pole. Snímač může zpracovat velmi pomalé otáčky kola, které z pasivního senzoru vypadnou, protože je zde amplituda konstantní.

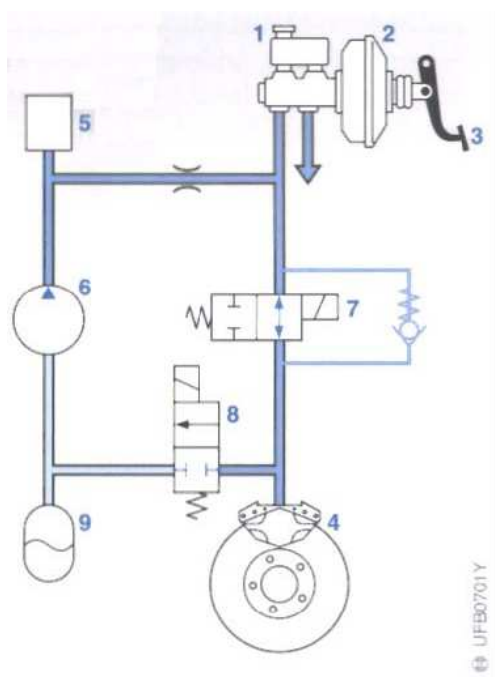
ABS může být vybaven podle provedení s dvěmi nebo čtyřmi snímači otáček kola. Se signály počtu otáček kola může řídicí jednotka vypočítat skluz mezi kolem a vozovkou.

### Řídicí agregát

Řídicí jednotka zpracovává informační signály snímače počtu otáček a dává ovládací příkazy hydraulické jednotce. Kromě toho hlídá funkci antiblokovacího systému a vypíná ho při jakékoliv chybě. Řídicí jednotka přeměňuje informace o počtu otáček na hodnoty, které odpovídají rychlosti otáčení kola a zrychlení a zároveň vytváří z jednotlivých rychlostí otáčení kol referenční rychlost vozidla. Rychlost otáčení kola každého kola se stále porovnává referenční rychlostí vozidla. Jejich odchýlením se aktivují magnetické ventily patřící brzdovému obvodu a zpětné čerpadlo. Antiblokovací opatření se provádí tak dlouho, dokud obě rychlosti nejsou téměř stejné.

ABS je vybaveno kontrolním bezpečnostní zapojením, jehož úkolem je rozpoznat chybné signály nebo chyby v systému a zakročit ve sledu funkcí. Rozpoznáním chyby se ABS vypne a zapnou se kontrolky. Vedle kontrolní funkce obsahuje bezpečnostní zapojení ještě vlastní test. Tímto testem se zkouší základní jednotky na své funkce díky diagnostickému programu a hlídají se zkušební signály na své účinky. Vestavěná kontrola se provádí při každém startu motoru. Během jízdy se také provádějí neustále testovací děje, aby byla zaručena nezávadná funkčnost systému.

### Hydraulická jednotka



1. hlavní válec s vyrovnávací nádrží
2. posilovač brzd
3. brzdový pedál
4. kolová brzda s brzdovým válcem kola
5. hydraulický agregát s komorou tlumiče
6. zpětné čerpadlo
7. přívodní ventil
8. vypouštěcí ventil
9. registr pro brzdovou kapalinu

Obr.7: Princip hydroagregátu s magnetickými ventily [3].



**Hydroagregát** představuje vedení řídicích jednotek a čerpání, nezávisle na řidiči, přes magnetické ventily tlaky v brzdách kol.

**Magnetické ventily** ovlivňují během regulace ABS hydraulický tlak v brzdném obvodu. Pro každý brzdový okruh připadá po jednom přívodním a jednom výpustním ventilu. U některých modelů je funkce těchto obou ventilů spojena do jednoho. Přívodní ventily jsou v klidové poloze otevřené, nacházejí se mezi hlavním a brzdovým válcem kola a používají se pro nárůst tlaku. Výpustné ventily jsou v klidovém stavu zavřené a oddělují kolové brzdy od zásobníku, využívají se pro snížení tlaku. Písty ventilů jsou v této pozici drženy pomocí mechanických pružin. Tyto písty se mohou zvedat (resp. klesat) proti mechanickým pružinám pomocí magnetismu vytvářeným proudem řídicí jednotkou ABS.

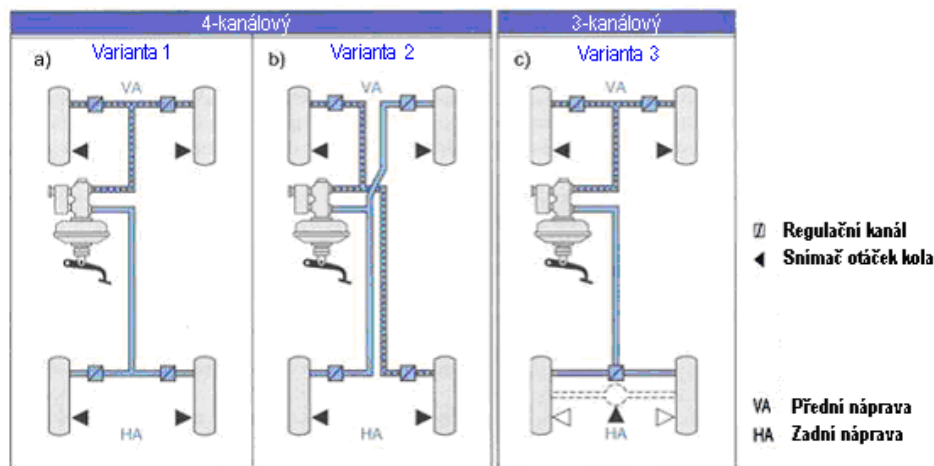
**Zásobní nádrž** přebírá funkci skladových zásob brzdné kapaliny pro zajištění hydraulických brzdných funkcí. Nádrž je rozdělena z bezpečnostních důvodů na tři komory. První komora zásobí oba přední brzdové okruhy brzdovou kapalinou, druhá hydraulické čerpadlo a třetí slouží pro zpětný běh z ventilového bloku. Dále ovládá výstražný kontakt, jímž je řidič varován o ztrátě brzdové kapaliny.

**Hydraulický posilovač brzd** přebírá posílení brzdné síly a zásobení brzdového obvodu brzdným tlakem.

**Tlaková nádoba** ukládá hydraulickou brzdovou energii a dává ji k dispozici při potřebě posilovače brzd, jakož to i zadního brzdového obvodu.

## 4.1 Varianty systému

Podle uspořádání brzdového systému, návrhu provozu vozidla a cenových aspektů mohou být postaveny rozdílné systémové varianty.



Obr.8: Systémové varianty [3].

Tato varianta dovoluje individuální řízení brzdného tlaku na všech kolech, což zaručí nejkratší brzdnou dráhu, je ale také nejnáročnější. Tato varianta je nutná pro vozidlo vybavené ASR, protože potřebuje informace o všech 4 kolech.

**b) 4 regulační kanály, 4 snímače zapojené diagonálně**

c) **3 regulační kanály**

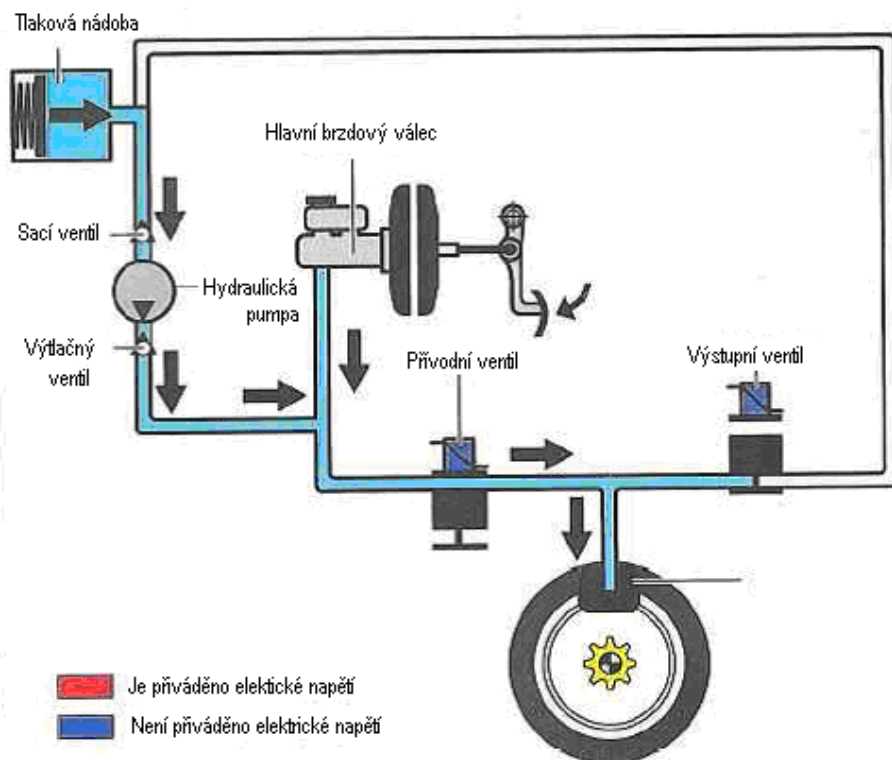
Toto sestavení se zavedlo jako standardní u vozidel s ABS (Obr. 4.5c). Zde jsou obě přední kola řízena individuálně, zatímco zadní kola jsou řízena na principu „select-low“. U tohoto principu jsou shromažďovány součinitele statického tření kol nápravy, přičemž nejnižší součinitel určí řízení. [3]

## 4.2 Brždění

Přepínáním elektromagnetických ventilů reguluje řídící jednotka tlak. Tím vznikají tři regulační fáze.

### 4.2.1 Fáze zvyšování tlaku

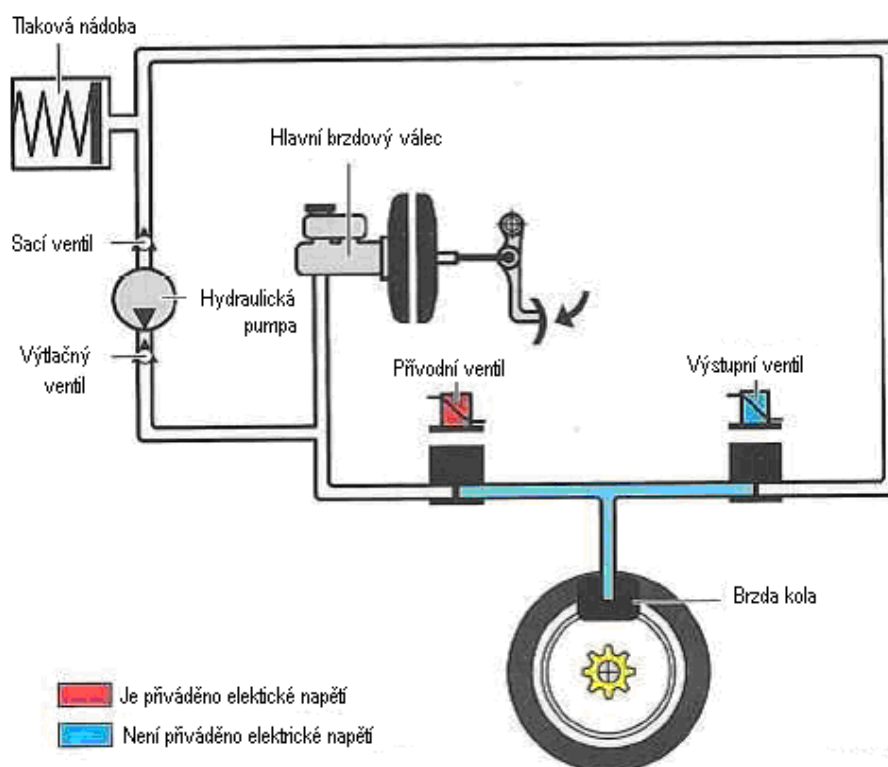
Brzdný tlak je vytvořen pomocí hlavního brzdného válce. Při brždění bez sklonu k blokování kola, jsou magnetické ventily v klidovém stavu, tzn. přívodní ventily jsou otevřeny a výpustní ventily zavřeny. Brzdný tlak v brzdovém obvodu může bez překážky narůstat a tím poklesne rychlost otáčení kola.



Obr.9: Fáze zvýšení tlaku [5].

### 4.2.2 Fáze stabilizace tlaku

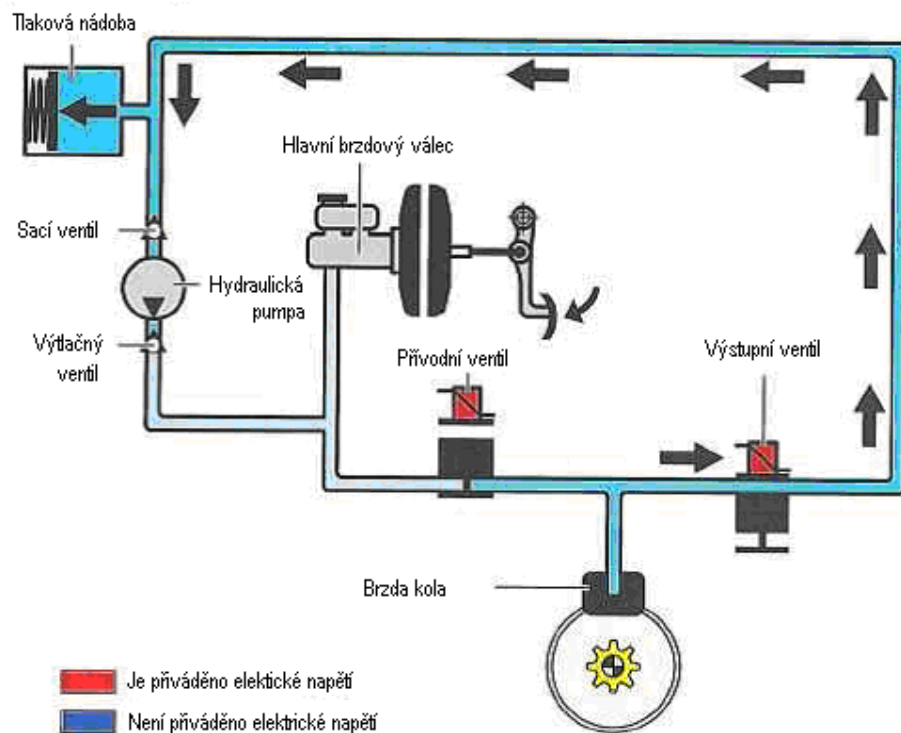
Při sklonu k blokování kola se pro vyvarování dalšího nárůstu brzdného tlaku zásobuje přívodní ventil napětím a tím zavře. Výpustný ventil zůstává bez napětí a tím rovněž zavřený. Brzdý tlak mezi přívodním a výpustným ventilem zůstává konstantní.



Obr.10: Fáze stabilizace tlaku [5].

### 4.2.3 Fáze snižování tlaku

Ačkoliv brzdý tlak zůstává konstantní, otáčky kola se dále snižují, nadále existuje sklon k blokování, a proto musí být brzdý tlak snížen. Výstupní ventil zásoben napětím a tím otevřen. Brzdý tlak je redukován přes tlakovou nádrž. Přívodní ventil je dále zásobován napětím, takže zůstává zavřen. Hydraulické čerpadlo se rozbíhá a čerpá z tlakové nádoby brzdovou kapalinu do hlavního brzdového válce. Brzdový pedál se pohybuje o něco málo nahoru. Jedoucí zablokované kolo opět zrychluje a získává na otáčkách.



Obr.11: Fáze snižování tlaku [5].

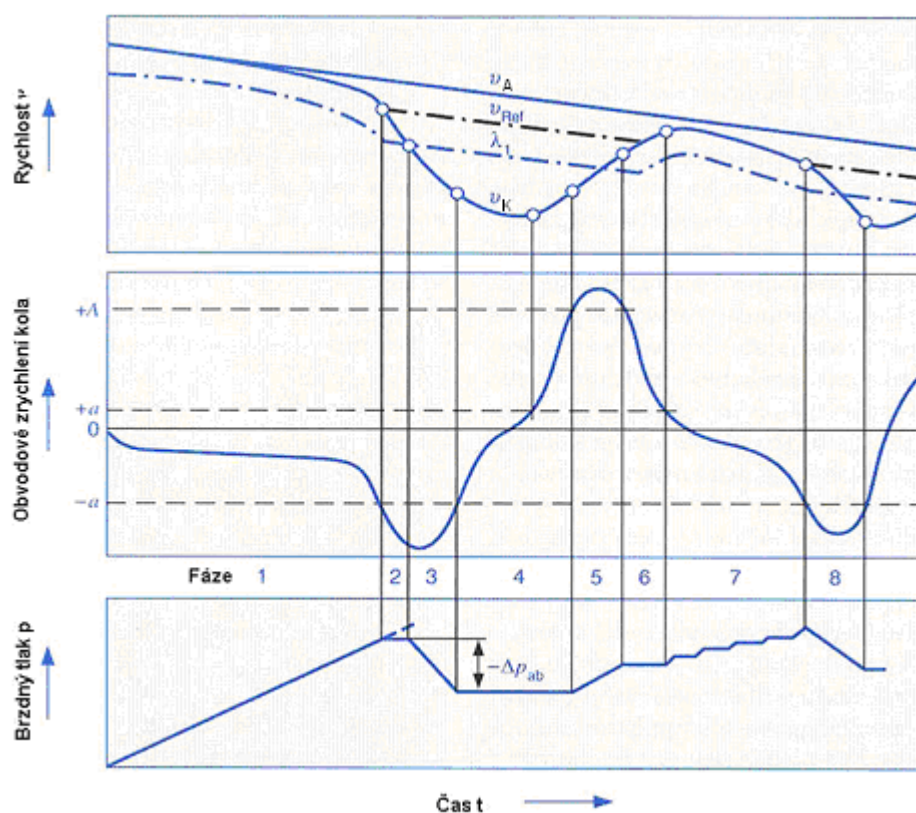
Pro optimální brždění je potřebné opětovné zvýšení tlaku od určitého počtu otáček kola. Přívodní i výstupní ventil se bez napětí přepnou do výchozích pozic. Hydraulické čerpadlo běží dále, nasává zbývající množství brzdové kapaliny z tlakové nádoby a v brzděném okruhu tak pracuje na posílení brzděného účinku. S přibýváním brzděného tlaku se kolo znovu zabrzdí a počet otáček kola se opět zmenší. Tato regulační fáze se opakuje několikrát za sekundu.

#### 4.2.4 Regulace brždění

Regulační cyklus se dělí na 8 fází:

1. Díky působení na brzdový pedál se zvyšuje brzdový tlak. Obvodová rychlost kola  $v_K$  klesá rychleji než auta až do doby, kdy úhlové zpoždění kola nepřekročí prahovou hodnotu  $-a$ , která je charakteristická pro maximální přilnavost.
2. Regulační ventily se přepnou do pozice „držet tlak“. Z klesající referenční rychlosti se odvodí prahová hodnota skluzu  $\lambda$ . Obvodová rychlost kola překročí tuto hranici.
3. Redukce brzděného tlaku dokud zpoždění kola je menší než  $-a$ .
4. Brzdový tlak je konstantní do doby než úhlové zrychlení kola nepřekročí prahovou hodnotu  $+A$ .
5. Zvyšování brzděného tlaku se děje tak dlouho až zrychlení kola opět nespadne pod  $+A$ .
6. Stálým překročením  $+a$  zůstává brzdový tlak konstantní. Na konci této fáze se zrychlení kola dostává pod prahovou hodnotu  $+a$  a kolo se nachází ve stabilní části charakteristiky přilnavost-skluz.

7. Brzdňý tlak je stupňovitě zvyšován až do překročení  $-a$ .
8. Dojde ke snížení brzdňého tlaku. [1]

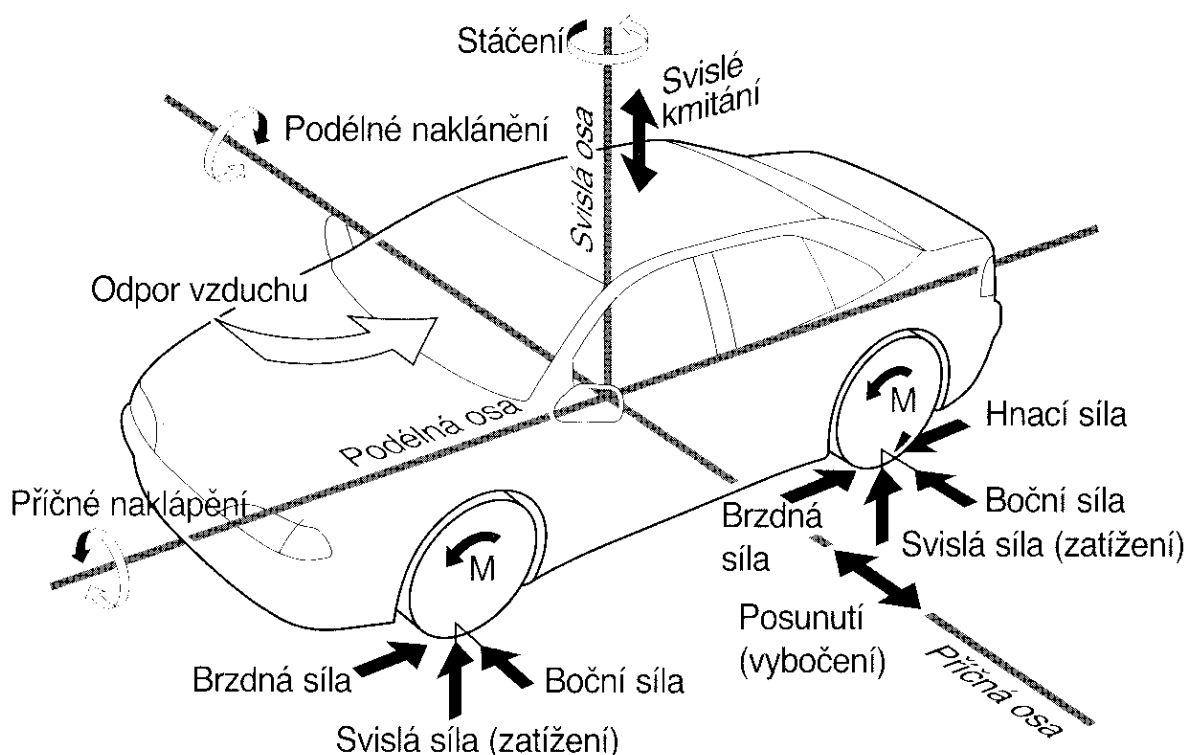


Obr.12: Regulace brždění při vysokých součinitelích přilnavosti [3].

## 5 Fyzikální základ

Každé těleso je popsáno na principu setrvačnosti, buď setrvává ve svém klidovém stavu nebo si uchovává pohybový stav. Aby se tento stav změnil, musí na těleso působit síla.

Obr. 2 znázorňuje možné síly ovlivňující pohyb automobilu. Lze je rozdělit na síly příčného a podélného směru, přičemž přes pneumatiku jsou navíc přenášeny síly „shora“ a „ze strany“.



Obr.13: Síly působící na vozidlo [3].

### 5.1 Řiditelnost a jízdní stabilita

Řiditelnost znamená, že při jízdě zatáčkou jsou k dispozici dostatečné boční vodící síly. Zablockované kolo přenáší plný podíl brzdné síly, a protože nezůstává žádný podíl pro boční vodící sílu, je neřiditelné.

Takzvaná Kamm'scheho kružnice (viz obr. 14) udává v jakém vztahu k sobě musí být síly působící na kolo pro dobrou řiditelnost.

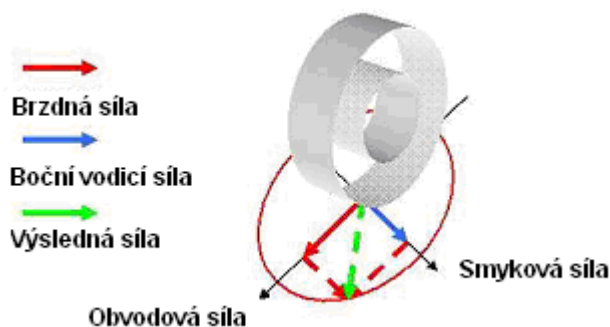
Jízdní stabilita znamená, že vozidlo při brždění zůstává zcela stabilní. Jestliže necháme působit pouze trakční sílu, kolo se sice zabrzdí v co nejkratším čase, ale na úkor stability, protože dotyková plocha pneumatiky nepřenáší žádnou boční sílu a nastává smyk. Řídicí jednotka hledá kompromisní řešení mezi řiditelností, jízdní stabilitou a brzdou dráhou. [5]

---

## 5.2 Síly přenášené pneumatikou

Pneumatika tvoří spojovací prvek mezi vozidlem a vozovkou. Veškeré změny směru tedy probíhají silami působících na pneumatiku. Kontakt k vozovce se uskutečňuje přes dotykovou plochu pneumatiky nazývanou Latsche.

Pneumatika přenáší podle fyzikálních zákonů hnací, brzdné a boční síly



Obr.14: Kamm'scheho kružnice = rozdělení sil [5].

- **Obvodová síla**

Obvodová síla pneumatiky  $F_u$  může být buď jako hnací (tažná) síla  $F_K$  vozidla zrychlována nebo jako brzdící síla  $F_B$  vozidla zpomalována.

- **Boční síla**

Boční síla  $F_S$  působí kolmo na směr posuvu kola a způsobuje tak změnu směru vozidla. Boční síla se může projevit např. vlivem bočního větru

- **Normálová síla.**

Normálová síla  $F_N$  (svislá síla pneumatiky) se sestává z váhy vozidla a nákladu dohromady a působí kolmo na vozovku. Mění se podle zatížení vozidla, působí ale vždy ve stejné míře pro jedoucí či stojící vozidlo.

- **Momenty**

Stáčivý moment vzniká při jízdě, kdy se obě poloviny vozidla nachází na vozovce s různou přilnavostí ( $\mu$ -split). Rozlišuje se mezi hnacím točivým momentem, který pro zrychlení vozidla musí překonat všechny jízdní odpory, a brzdícím momentem, který zpomaluje pneumatiku a tím následně vozidlo.

- **Statický součinitel tření.**

Statický součinitel tření  $\mu_{HF}$ , nazývaný také brzdňý součinitel, součinitel tření. Uvádí, kolik síly v podélném směru na povrchu vozovky může být přeneseno. Na suché, čisté vozovce bývá dosaženo nejvyšších hodnot (0,8÷1,0) a na zledovatělé nejnižších (0,05-0,10). Statický

---

součinitel tření v příčném směru  $\mu_s$  se nazývá součinitel boční vodící síly/koefficient boční síly.

- **Třecí síla.**

Třecí síla  $F_z$  je ta síla, která je potřebná, aby předmět byl táhnut po povrchu. Je úměrná normálové síle a stanoví se přes součinitele tření:

$$F_z = \mu_x \cdot F_N \quad (1)$$

Rozlišuje se mezi třemi různými třecími silami: odpor při valení, statické tření a smykové tření. Každá z těchto tří třecích sil má svůj charakteristický součinitel. U valivého tření je nejmenší, u statického největší. U vozidla, které jede po silnici vystupuje mezi pneumatikou a vozovkou valivé tření. Zabržděním vozidla vzniká mezi pneumatikou a vozovkou statické tření (kolo se ještě točí), popř. smykové tření (kolo je zablokováno). U vozidla s ABS se vyskytuje u brzd jen tření za klidu, protože se kolo nezablokuje. [3]

### 5.3 Skluz pneumatiky

Skluz (prokluz) představuje rozdíl rychlosti mezi kolem a vozovkou.

Skluz pro hnací kolo: 
$$\lambda = \frac{v_K - v_A}{v_K} = \frac{r_d \cdot \dot{\phi}_K - v_A}{r_d \cdot \dot{\phi}_K} = 1 - \frac{v_A}{v_K} \quad (2)$$

$$\text{pro: } v_A \geq 0, \dot{\phi}_K \geq 0, v_K \geq v_A$$

Skluz pro brzděné kolo: 
$$\lambda = \frac{v_A - v_K}{v_A} = \frac{v_A - r_d \cdot \dot{\phi}_K}{v_A} = 1 - \frac{v_K}{v_A} \quad (3)$$

$$\text{pro: } v_A \geq 0, \dot{\phi}_K \geq 0, v_K \leq v_A$$

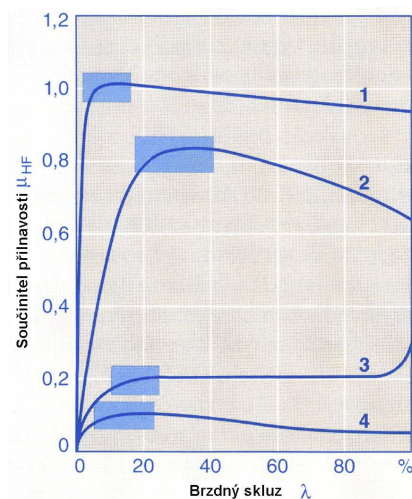
$\lambda$  = skluz

$v_A$  = rychlost vozidla

$v_B$  = obvodová rychlost kola

Při skluzu 0% se kolo točí odpovídající rychlostí vozidla, volně běží. 100% skluz znamená, že je kolo zablokováno.





Obr.15: Závislost součinitele přilnavosti na brzděném skluzu [3].

- 1 - radiální pneumatika na suchém betonu
- 2 - diagonální pneumatika na mokřém asfaltu
- 3 - radiální pneumatika na sněhu
- 4 - radiální pneumatika na náledí

Modré plochy představují přechod ze stabilní do nestabilní oblasti

---

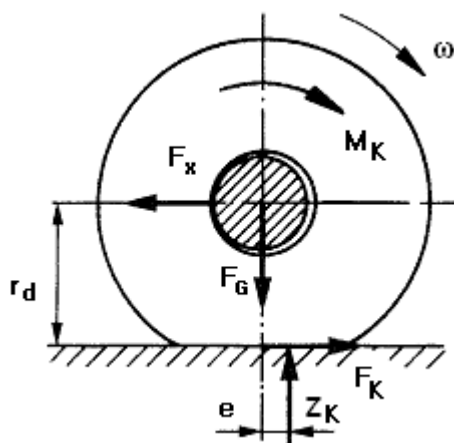
## 6 Vytvoření modelu v programu Matlab-Simulink

Prostředí Simulink je nadstavba programu Matlab. Simulink obsahuje knihovny (toolboxy) s bločky, pomocí nichž lze jednoduše vymodelovat dynamický systém a následně ho odsimulovat.

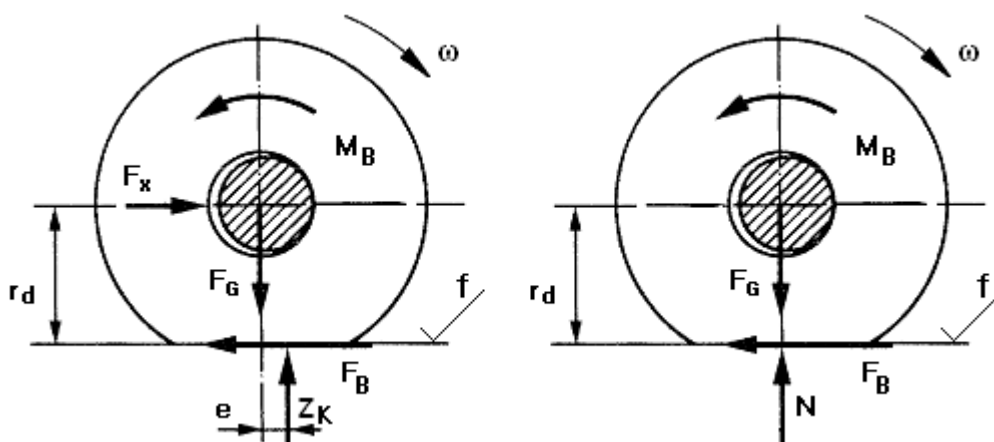
### 6.1 Silové poměry kola

Když se kolo volně odvaluje, má stejnou rychlost jako automobil:  $v_a = v_k$ . Působící síly mezi kolem a vozovkou jsou si rovny. Při brždění vzniká nová, třecí síla  $F_z$ , působící proti směru otáčení kola. Tato síla způsobuje skluz.

Skluz  $\lambda$  vyjadřuje situaci, kdy  $v_a \neq v_k$ , tzn. kdy obvodová rychlost kola se liší od středové rychlosti kola, která je totožná s rychlostí vozidla. Nastane-li brždění, pak  $v_a > v_k$



Obr.16: Síly působící na hnací kolo.



Obr.17: Síly působící na bržděné kolo.

Obrázek zobrazuje síly působící v podélném směru. Tím byl zvolen dynamický model kola, který dále budeme považovat jako čtvrtinový model vozidla, přičemž hmotnost kola bude představovat 1/4 hmotnosti vozidla.

## 6.2 Pohybová rovnice kola

Když se zajímáme o dynamiku vozidla, sledujeme především pohyby, které vykonává.

Kolo vykonává současně 2 pohyby: přímočarý a rotační.

Pro translační pohyb:

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (4)$$

Pro rotačním pohyb:

$$\sum M = J \cdot \ddot{\varphi} \quad (5)$$



Podle zvolené konvence rozepíšeme působící síly na brzdící kolo.

Suma sil působících na kolo ve směru  $x$ :

$$\Sigma F_x : \quad -F_B = m \cdot a_x \quad (6)$$

$$F_B = F_T = \mu \cdot N = \mu \cdot m_k \cdot g \quad (7)$$

Suma sil působících na kolo ve směru  $y$

$$\Sigma F_y : \quad N - F_G = m \cdot a_y \quad (8)$$

$$a_y = 0 \quad (9)$$

$$F_G = N = m_k \cdot g \quad (10)$$

$$\ddot{x} = -\frac{\mu \cdot m_k \cdot g}{m_k} \quad (11)$$

Suma momentů působících na kolo:

$$\Sigma M : \quad -M_B + F_B \cdot r_d = J \dot{\omega} \quad (12)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{J} \cdot (-M_B + \mu \cdot m_k \cdot g \cdot r_d) \quad (13)$$

Další důležité vztahy pro výpočty:

$$\text{Moment setrvačnosti kola: } J = \frac{1}{2} m_k \cdot r_d^2 \quad (14)$$

$$\text{Brzdny moment:} \quad M_B = F_B \cdot r_d \quad (15)$$

$$\text{Hmotnost} \quad m_k = \frac{m_a}{4} \quad (16)$$

$$\text{Coulombův zákon} \quad F_T = \mu \cdot N, \text{ pro } v \neq 0$$

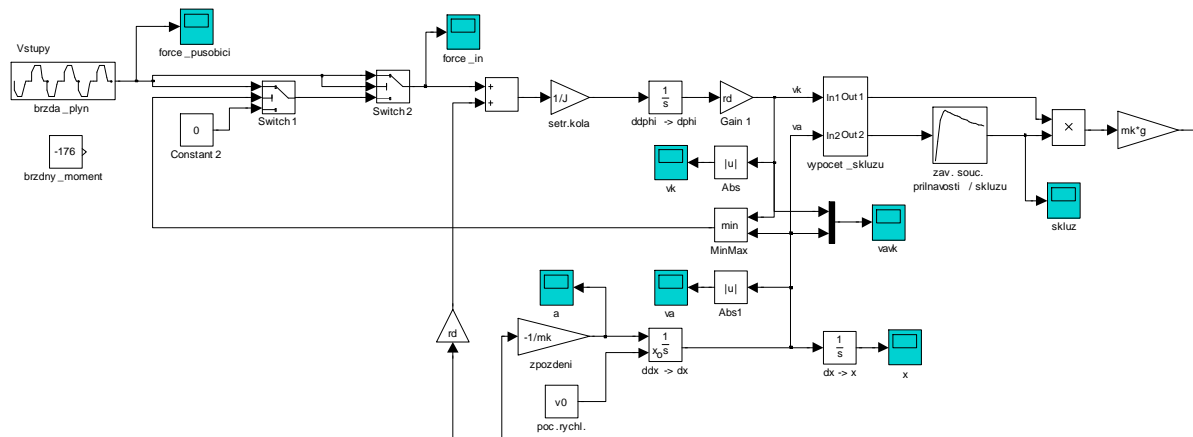
$$v_k = \omega \cdot r_d \quad (17)$$

Jelikož rovnice pro výpočet skluzu platí je za určitých podmínek, především pro nenulovou rychlost, bylo třeba ji upravit:

$$\lambda = \frac{\dot{\phi}R - \dot{x}}{\max(|\dot{x}|, |\dot{\phi}R|, \varepsilon)} \quad [12] \quad (18)$$

### 6.3 Model kola bez ABS

Ze sestavených rovnic byl odvozen model v prostředí Matlab/SIMULINK. Pro práci v tomto programu je nutné nejprve si vyjádřit z diferenciálních rovnic nejvyšší derivaci (rovnice 11 a 13 )



Obr.18: Model bržděného kola (movement\_of\_car.mdl).

Hodnoty vstupují do výpočtů modelu (movement\_parametry.m):

```
mk = 270; % kg = 1/4 ma
rd = 0.25; % m
g = 9.81; % kg*m/s^2
J = 0.91; % kg*m^2
v0 = 10; % m/s
```

Jelikož je stále počítáno s třením, byl zvolen řešič ode23s (stiff/Mod.Rosenbrock).

Horní část modelu představuje rychlost  $v_k$ , kdy obvodové zrychlení je integrováno pro získání obvodové rychlosti  $\omega_k$ . Po jejím vynásobení poloměrem kola  $r_d$  dostáváme žádanou rychlost kola  $v_k$  podle rovnice (17).

Ve spodní části je modelován přímočarý pohyb, jakožto pohyb vozidla. Integrací zrychlení je dosaženo rychlosti  $v_a$  při počáteční podmínce  $v_0$ .

Obě rovnice jsou dosazeny do vztahu (18) a následně vypočten skluz pneumatiky  $\lambda$ . Bloček „zav. souc. přilnavosti / skluzu“ představuje jízdu po suchém betonu. Do rovnice vyjadřující rotační pohyb vstupuje brzdňý moment  $M_B$  charakterizující sešlápnutí brzdňého pedálu. Ten je v modelu nahrazen konstantou se zápornou hodnotou pro simulaci konstantního brždění a bločkem 'brzda\_plyn' pro reálné chování řidiče při brždění.

Z porovnání sil působících na hnací a brzdňé kolo, je patrné, že se mění směr, a tudíž znaménko, u momentu a následně u tečné reakce. Pro obecný pohyb vozidla je do modelu přiváděna sekvence kladných, nulových i záporných hodnot simulujících sešlápnutí plynového pedálu, setrvačnou jízdu a brždění.

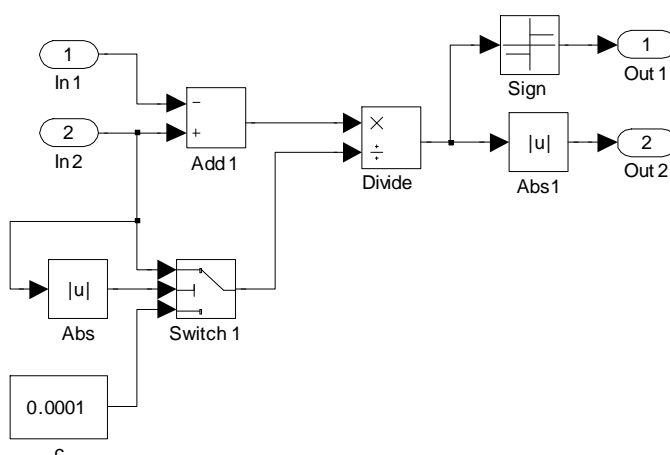
### Zamezení zpětného pohybu

V případě klidového stavu vozidla i pneumatiky a současného působení záporného momentu vykresluje zápornou rychlost. Pro detekci a zamezení nechtěného „couvání“ se použilo přepínačů.

Switch1 neumožňuje žádnou změnu rychlosti po dosažení  $v = 0$  m/s. Pokud je jedna z rychlostí menší než 0,001 (=threshold), vpouští se do modelu pouze nulový signál. Tímto zásahem by se zcela vyrušili ostatní části signálu přiváděného do modelu, tedy opakované brždění a rozjezdy. Switch2 dovoluje opětový rozjezd z nulové rychlosti porovnáním přiváděného signálu a rychlosti.

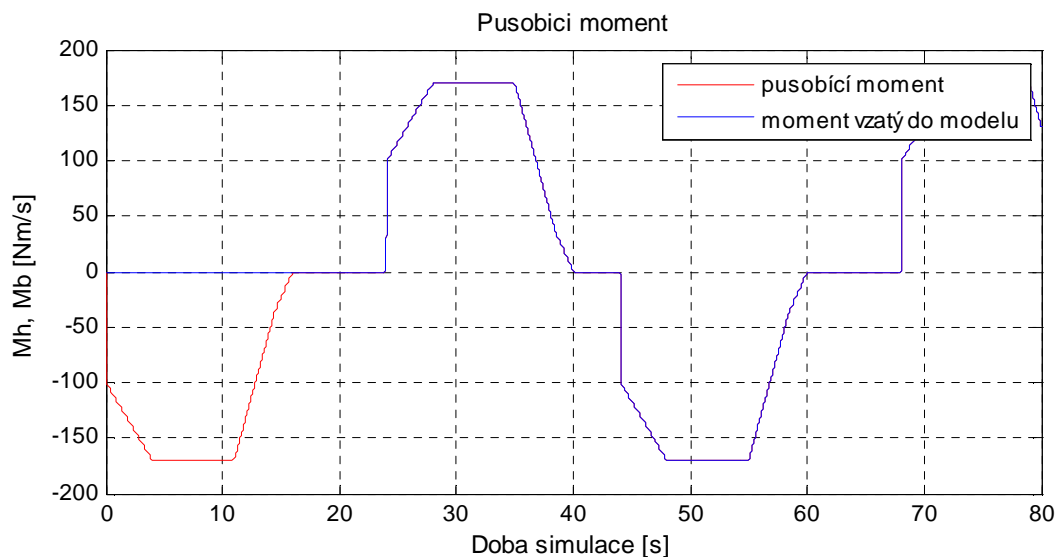
### Výpočet skluzu

Pro zajištění dělení číslem  $\geq 0$ , podle upravené rovnice skluzu (rce 18) byl v modelu použit přepínač. V případě, že rychlost vozidla  $v_a \leq 0,0001$ , switch použije hodnotu konstantní hodnotu  $c = 0,001$ .



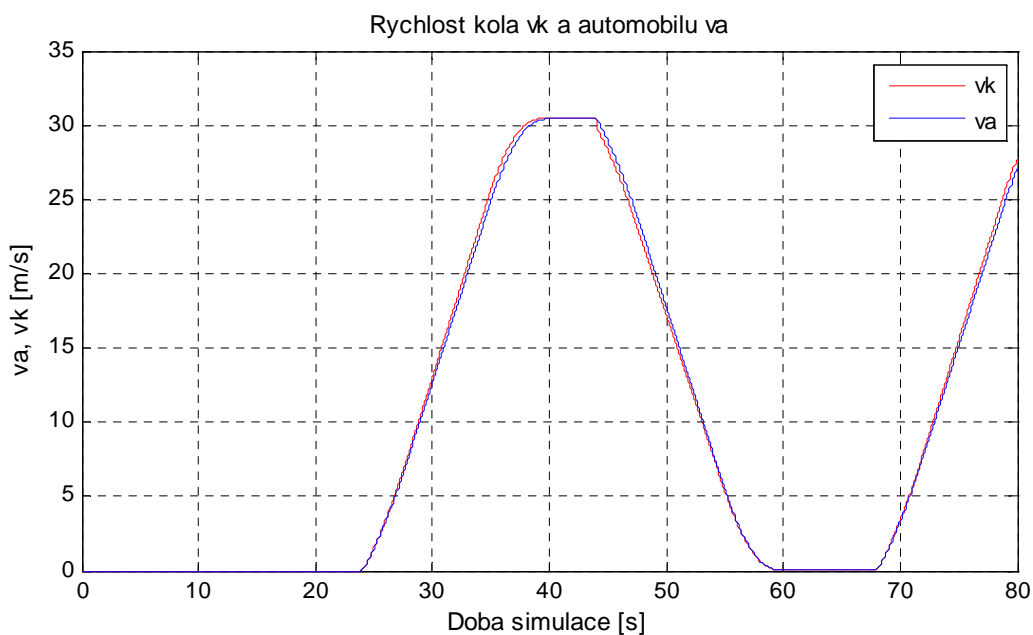
Obr.19: Subsystém „vypocet\_skluzu“.

## Výsledné grafy



Obr.20: Působící moment simulující sešlápnutí pedálu brzd, plynu.

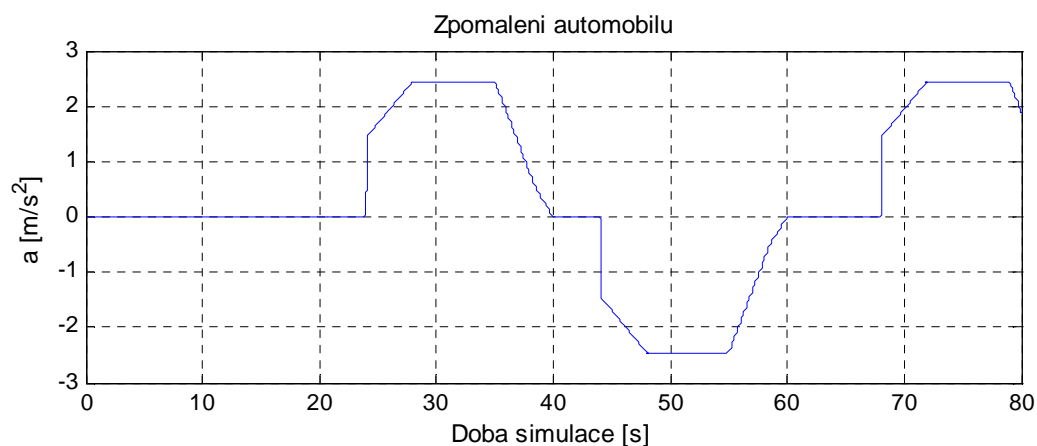
Graf vyjadřuje stav, kdy je vozidlo v klidovém stavu, ale je působeno brzděným momentem. Model v tomto případě počítá pouze s nulovou hodnotou, pro tuto dobu je  $v = 0 \text{ m/s}$ .



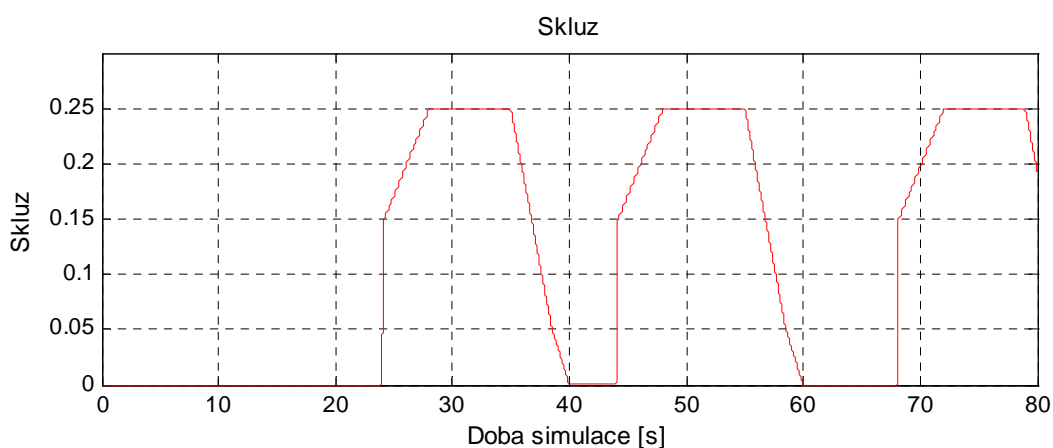
Obr.21: Rychlost kola a vozidla při  $v_0=0 \text{ m/s}$ .

Při rozjezdu je pro překonání třecích sil mezi kolem a vozovkou potřeba určité síly. Při sešlápnutí plynového pedálu se rychlost kola začne převyšovat rychlost vozidla. Po tuto dobu kola táhnou vozidlo. Když není ani na jeden pedál působeno, rychlosti se srovnají a skluz je nulový. Při brždění je tomu naopak. Zatímco kolo zpomaluje, vozidlo je hnáno setrvačnou

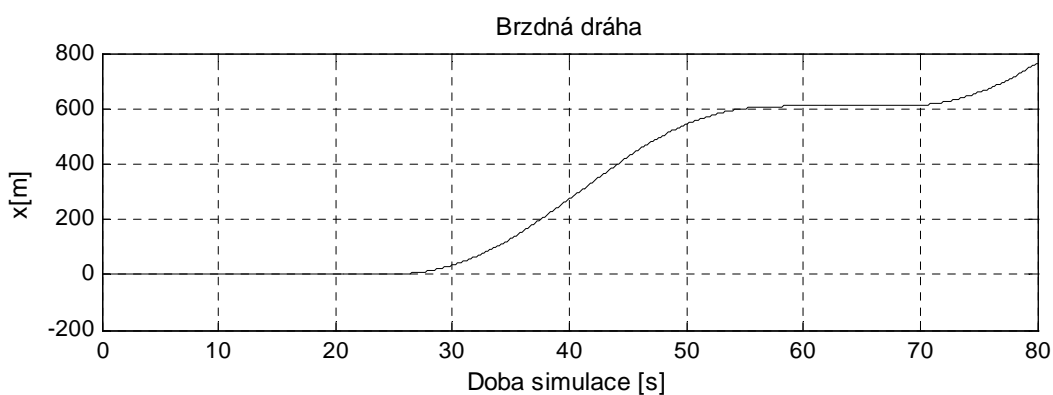
silou kupředu. Skluz narůstá. Čím prudší zabrzdění, tím výraznější naklonění karoserie dopředu pozorujeme.



Obr.22: Zrychlení (zpomalení) při  $v_0 = 0\text{m/s}$ .



Obr.23: Skluz při  $v_0 = 0\text{ m/s}$ .



Obr.24: Brzdná dráha při  $v_0 = 0\text{m/s}$ .

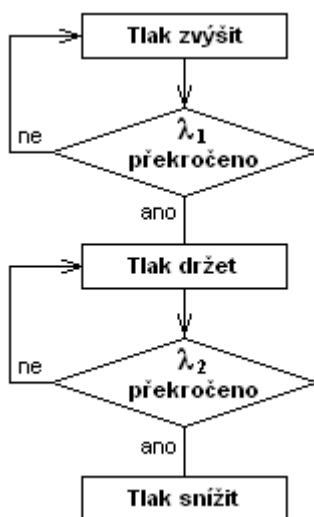
---

## 6.4 Řízení

### 6.4.1 Zamezení blokování prostřednictvím skluzu kola

Řídicí jednotka se snaží udržet vozidlo na vozovce při co nejvyšší přilnavosti. Jelikož se nedá skluz brzděného kola měřit přímo, používá se jako regulační veličina relativní skluz. Měřená rychlost kola se srovnává s referenční rychlostí auta. Referenční rychlost se počítá z hodnot rychlosti od dvou diagonálně se k sobě nacházejících kol, tedy vždy poháněné a unášené kolo. Při jízdě zledovatělé ploše, kdy se kola protácejí, by byla referenční rychlost byla větší než rychlost vozidla, je vzata rychlost pomalejšího, nepoháněného a tím také neprotáčejiho kola.

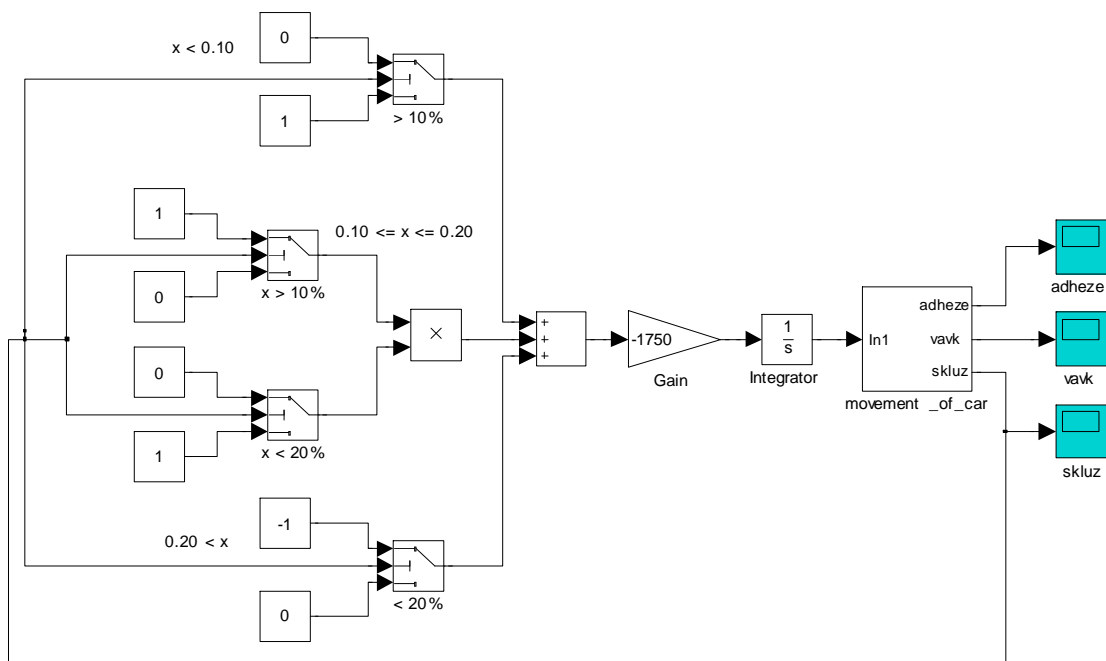
Následující schéma objasňuje předpověď blokování pomocí skluzu kola. Zde byly položeny hraniční hodnoty  $\lambda_1 = 10\%$  a  $\lambda_2 = 20\%$  jakožto krajní hodnoty intervalu pracovní oblasti ABS podle obr. (2).



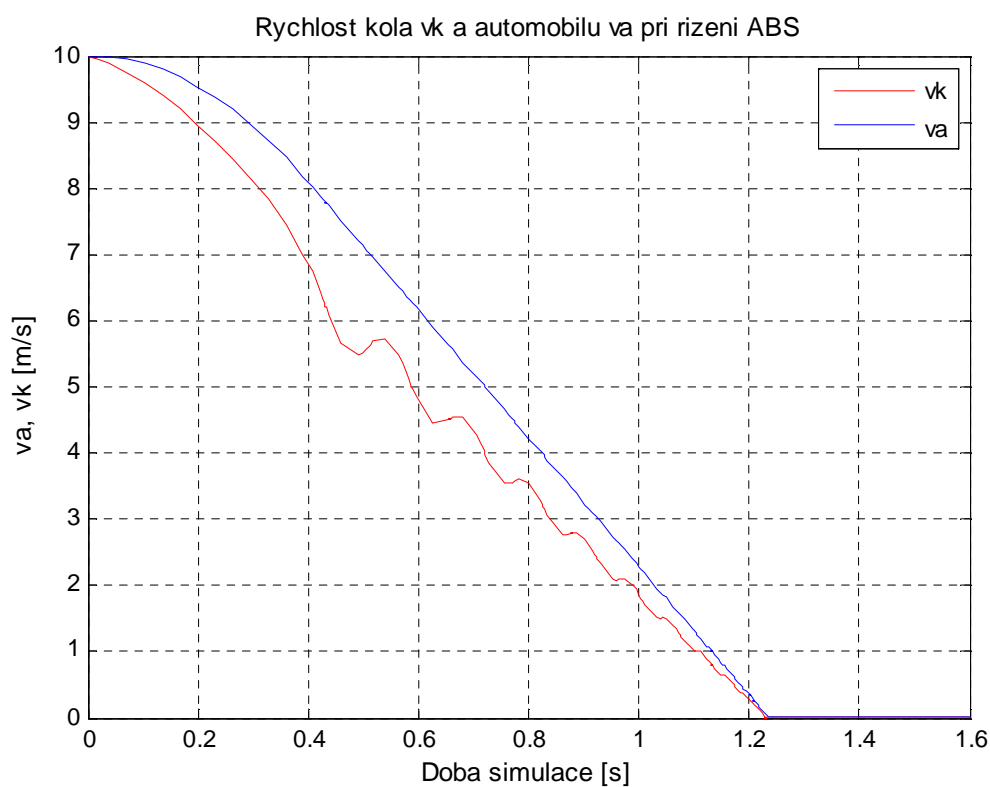
Obr.25: Schéma regulačního cyklu řízeného skluzem.

Jakmile řidič šlápne na brzdový pedál, vzrůstá brzdný tlak v brzdových válcích kol. To se děje tak dlouho, dokud není překročeno  $\lambda_1$ . Pak se magnetické ventily nastaví na pozici „držet tlak“. Na základě brzdného tlaku a technicky vyhrazené čekací doby překročí kola popřípadě ještě druhou prahovou hodnotu  $\lambda_2$  a opustí optimální rozsah skluzu. Tehdy se magnetické ventily přepnou na „tlak snížit“. Kola se odlehčí a opět zvýší rychlost na rychlost vozidla. Kola nadále ztrácejí skluz a opětovným dosažením  $\lambda_1$  začne nová regulace zvýšením tlaku.



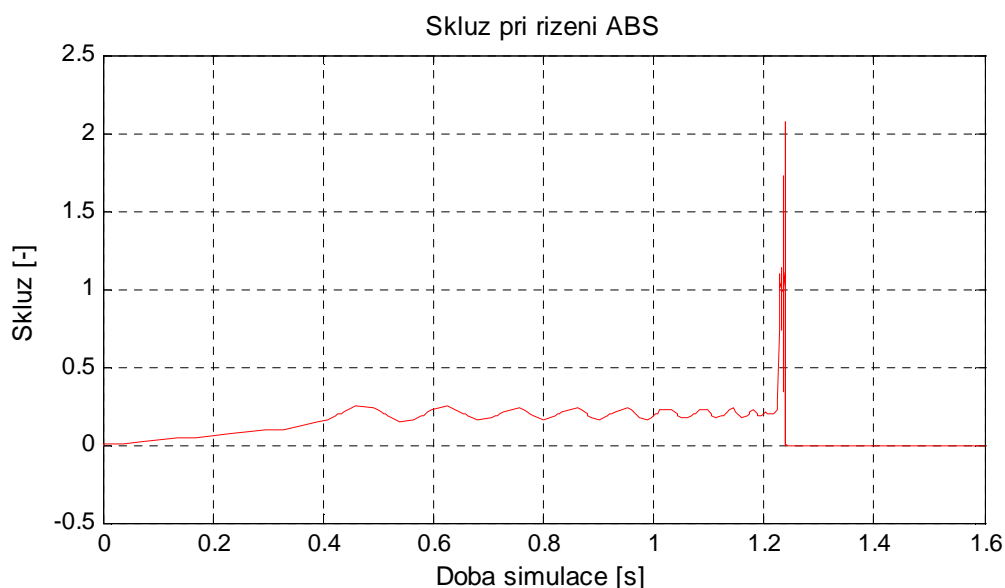


Obr.26: Řízení skluzu pomocí hraničních hodnot skluzu (movement\_of\_car\_ABS\_skluz)



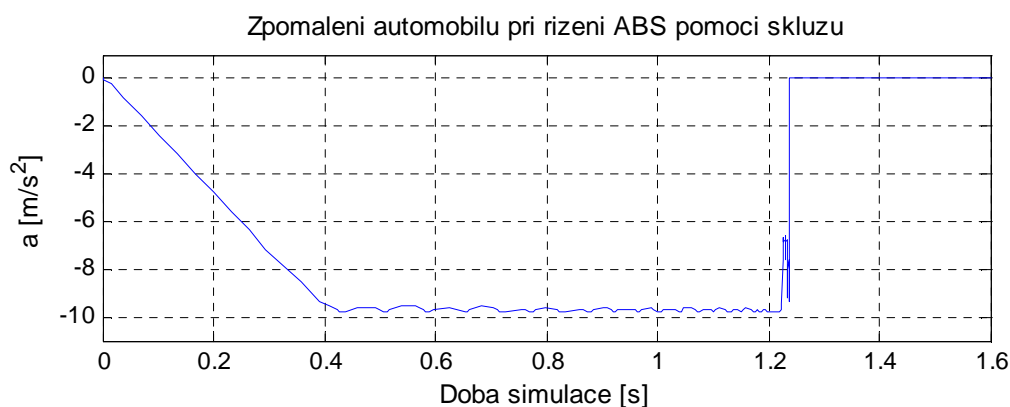
Obr.27: Rychlosti při řízení skluzu pomocí hraničních hodnot skluzu

Hraniční hodnoty skluzu určují regulační zásah, Tedy posílání kladných nebo záporných hodnot do modelu vozidla. Na tyto podněty reaguje rychlost kola.



Obr.28: Řízený skluz pomocí hraničních hodnot

Žádaná hodnota skluzu není dána přímo, pouze její hraniční hodnoty mezi nimiž se kmitá. Při dosažení nulové rychlosti se skluz dostává na hodnotu 1. Další překmit je způsoben prudkým poklesem rychlosti, kdy nastavený krok nepostihl dosažení nulové hodnoty rychlosti.



Obr.29: Zpomalení vozidla pomocí hraničních hodnot skluzu

### 6.4.2 Regulátor

Tento řídicí cyklus lze pro model ještě více zjednodušit – pomocí PID regulátoru, jemuž stačí zadat pouze hodnotu požadovaného skluzu, tedy hodnotu náležící intervalu  $\langle 0,1;0,2 \rangle$ .

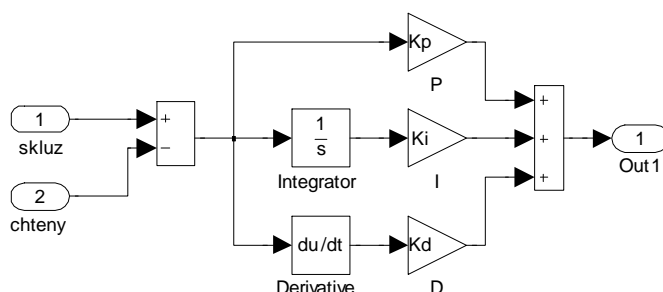
Regulátor je aktivní člen regulačního obvodu, jenž nastavuje řídicí veličinu  $u$  pomocí informací o žádané hodnotě  $r$  a o skutečné hodnotě regulované veličiny  $y$ . Ta je získána měřením a přivedena do regulátoru pomocí zpětnovazebního zapojení.

Vliv parametrů regulátoru

P – zvětšování zvyšuje rychlost a snižuje stabilitu

I – zvětšování snižuje rychlost a zvyšuje stabilitu

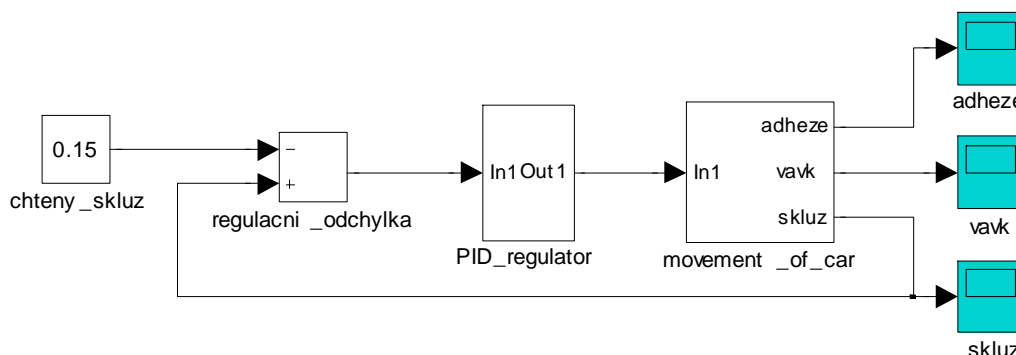
D – zvětšování zvyšuje rychlost a zvyšuje stabilitu



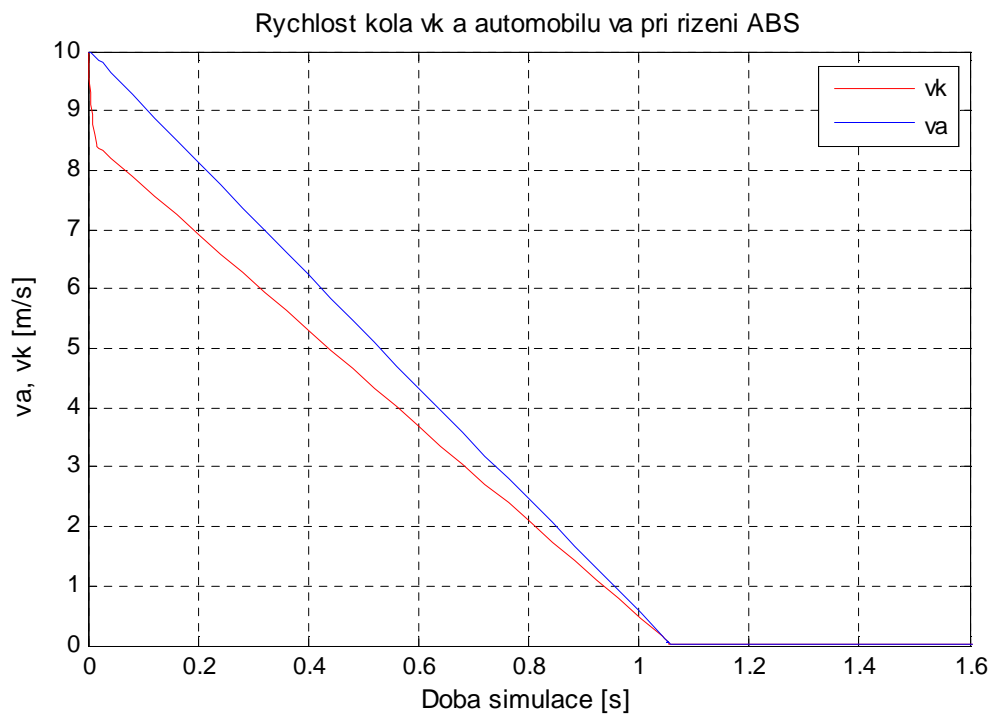
Obr.30: PID-regulátor navržený v prostředí Matlab Simulink.

Parametry PID reglátoru byly nastaveny ručně. Cílem metody bylo dosáhnout takového zesílení P a I-složky, aby průběh přechodového děje byl dostatečně rychle regulován a případné zakmitání postihovalo interval bezpečného působení ABS.

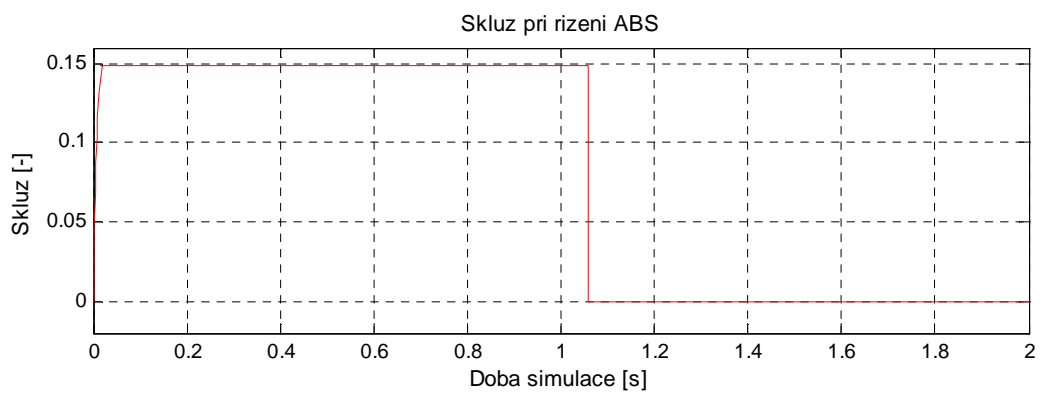
Při nulové I a D složce se postupně zvětšuje zesílení P-složky dokud nenastane viditelný překmit. Hodnota proporcionálního členu se vezme taková, kde se překmit ještě neprojeví. Pak se začne zvyšovat integrační složka. Úpravou derivačního členu se snižuje překmit vzniklý I-složkou.



Obr.31: Řízení čtvrtinového modelu automobilu pomocí skluzu (movement\_of\_car\_ABS\_PID.mdl).



Obr.32: Rychlosti s řízením ABS pomocí PID při  $v_0 = 10$  m/s.



Obr.33: Řízení skluzu na hodnotu 0.15.

---

## 7 Závěr

Nastudováním mnohých podkladů o protiblokovacím systému ABS mohu říci, že je sice založen na jednoduchém principu, skrývá však mnohá úskalí. Stručné shrnutí je obsaženo v práci.

Protože dynamika vozidla tvoří rozsáhlý komplex problémů, bylo nutné zaměřit se pouze na určitou oblast. Zjednodušení jsem provedla výběrem podélné dynamiky.

Pro každé testování je třeba mít k dispozici model. Model kola představuje základní kámen pro celou simulaci. Pneumatika je totiž spojovací prvek mezi vozidlem a vozovkou. Veškeré změny směru tedy probíhají silami působících na pneumatiku.

Simulační program Matlab-Simulink mi umožnil vytvoření modelu kola pomocí několika bloků při zachování plné funkce. Pomocí tohoto modelu reprezentujícího čtvrtinu vozidla jsem provedla několik simulací připojením různých vstupů vyjadřujících reálné chování řidiče při jízdě.

Řízení ABS bylo založeno na takové hodnotě skluzu, která představuje největší přilnavost. Doplněním modelu o PID regulátor a vhodným nastavením parametrů bylo dosaženo požadovaného skluzu. Největším problémem mi dělala křivka přilnavosti, která není lineární. Právě v jejím zlomu pracuje ABS. Regulátor tedy dokáže přiblížení k požadované hodnotě pouze z jedné poloroviny.

Řízení ABS na polovičním modelu vozidla nebylo dosaženo z časových důvodů. Příliš jsem se zabírala maličkostmi, které často nebyly ani podstatné nebo vedly k příliš komplikovanému či nereálnému řešení.

---

## POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY

- [1] VLK, F.: *Dynamika motorových vozidel*. Nakladatelství Vlk, Brno, 2000, 392 str., ISBN 80-238-5273-6
- [2] VLK, F.: *Elektronické systémy motorových vozidel 2*. Nakladatelství Vlk, Brno, 2002, 294 s. ISBN 80-238-7282-6
- [3] ROBERT BOSCH GmbH: *Konvenční a elektronické brzdové systémy*. Žlutá řada 2005, 134 s., ISBN 80-903132-6-4
- [4] NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. MONTANEX a.s., Ostrava, 1.vyd., 1999, 276 s., ISBN 80-7225-030-2
- [5] Kfz-Technik, Wissenswertes, Simulation, Fragen, Aufgaben [online]. Dostupné z: <<http://www.kfz-tech.de>>
- [6] Technický slovník [lexikon online]. Dostupné z:<<http://cs.autolexicon.net/google/>>
- [7] SCHRAML, Martin. martin-schraml.de [online]. 1999, 20.11.2005 [cit. 2007-12-20]. Dostupné z: <<http://martin-schraml.de/facharbeit/facharbeit.htm>>
- [8] Internetová encyklopedie [online]. Dostupné z: <<http://wikipedia.org>>
- [9] Volkswagen Das Auto [online]. Dostupné z: <<http://www.volkswagen.cz/lexikon/>>
- [10] Studijní opory, Mechanika těles – Dynamika [online]. Dostupné z: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/>>
- [11] AutoBild [online]. Dostupné z: <[http://www.autobild.de/artikel/studie-ueber-aktive-sicherheitssysteme\\_44153.html](http://www.autobild.de/artikel/studie-ueber-aktive-sicherheitssysteme_44153.html)>
- [12] GREPL, R.: *Vehicle\_dynamics.ppt*.
- [13] *Simulink User's Guide*. The Math Works, Inc, © COPYRIGHT 1994-2000

---

## SEZNAM SYMBOLŮ

$+A$	prahová hodnota zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$\pm a$	prahová hodnota zrychlení kola [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$a$	zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$a_x$	zrychlení ve směru x [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$a_y$	zrychlení ve směru y [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$e$	posunutí vlivem deformace [ $m$ ]
$f$	součinitel tření [-]
$F_B$	brzdící síla [ $N$ ]
$F_G$	gravitační síla [ $N$ ]
$F_K$	hnací síla [ $N$ ]
$F_S$	boční síla [ $N$ ]
$F_U$	obvodová síla [ $N$ ]
$F_x$	síla ve směru x [ $N$ ]
$F_y$	síla ve směru y [ $N$ ]
$F_z$	třecí síla [ $N$ ]
$g$	gravitační zrychlení 9,81 [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$J$	moment setrvačnosti [ $kg \cdot m^2$ ]
$m$	hmotnost [ $kg$ ]
$m_a$	hmotnost automobilu [ $kg$ ]
$m_k$	hmotnost kola [ $kg$ ]
$M$	moment [ $N \cdot m$ ]
$M_B$	brzdny moment [ $N \cdot m$ ]
$N$	normálová síla [ $N$ ]
$r_d$	dynamický poloměr kola [ $m$ ]
$v_0$	počáteční rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$v_a$	rychlost automobilu [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$v_k$	obvodová rychlost kola [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$v_{ref}$	referenční rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$Z_K$	radiální reakce kola [ $N$ ]
$\varepsilon$	konstanta
$\lambda$	skluz [-]
$\lambda_l$	dolní hodnota skluzu [-]
$\lambda_2$	skluz bržděného kola [-]
$\lambda_A$	hnací skluz [-]
$\lambda_B$	skluz bržděného kola [-]
$\mu_{HF}$	statický součinitel tření [-]
$\omega$	úhlová rychlost [ $rad \cdot s^{-1}$ ]
$\varphi$	úhlová zrychlení kola automobilu [ $rad \cdot s^{-2}$ ]

---

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr.1: *Bezpečnostní systémy v automobilu.*  
Obr.2: *Pracovní oblast ABS.*  
Obr.3: *Regulační obvod ABS.*  
Obr.4: *Brzdové zařízení.*  
Obr.5: *Pasivní snímač otáček kola.*  
Obr.6: *Aktivní snímač otáček kola.*  
Obr.7: *Princip hydroagregátu s magnetickými ventily.*  
Obr.8: *Systémové varianty.*  
Obr.9: *Fáze zvýšení tlaku.*  
Obr.10: *Fáze stabilizace tlaku.*  
Obr.11: *Fáze snižování tlaku.*  
Obr.12: *Regulace brždění při vysokých součinitelích přilnavosti.*  
Obr.13: *Síly působící na vozidlo.*  
Obr.14: *Kamm'scheho kružnice = rozdělení sil.*  
Obr.15: *Závislost součinitele přilnavosti na brzděném skluzu.*  
Obr.16: *Síly působící na hnací kolo.*  
Obr.17: *Síly působící na brzděné kolo.*  
Obr.18: *Model brzděného kola (movement\_of\_car.mdl).*  
Obr.19: *Subsystém „vypocet\_skluzu“.*  
Obr.20: *Působící moment simulující sešlápnutí pedálu brzdy, plynu.*  
Obr.21: *Rychlost kola a vozidla při  $v_0=0$  m/s.*  
Obr.22: *Zrychlení (zpomalení) při  $v_0 = 0$  m/s.*  
Obr.23: *Skluz při  $v_0 = 0$  m/s.*  
Obr.24: *Brzdná dráha při  $v_0 = 0$  m/s.*  
Obr.25: *Schéma regulačního cyklu řízeného skluzem.*  
Obr.26: *Řízení skluzu pomocí hraničních hodnot skluzu (movement\_of\_car\_ABS\_skluz)*  
Obr.27: *Rychlosti při řízení skluzu pomocí hraničních hodnot skluzu*  
Obr.28: *Řízený skluz pomocí hraničních hodnot*  
Obr.29: *Zpomalení vozidla pomocí hraničních hodnot skluzu*  
Obr.30: *PID-regulátor navržený v prostředí Matlab Simulink.*  
Obr.31: *Řízení čtvrtinového modelu automobilu pomocí skluzu.*  
Obr.32: *Rychlosti s řízením ABS pomocí PID při  $v_0 = 10$  m/s.*  
Obr.33: *Řízení skluzu na hodnotu 0.15.*



---

## **SEZNAM ZKRATEK**

**EBV** Elektronické rozdělování brzdné síly

**ASR** Protiprokluzový systém

**ASC** Automatická kontrola stability

**ESP** Elektronický systém jízdní stability

**ABS** Protiblokovací systém ABS